

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ ФОТОСЪЁМКИ ДЛЯ СЧИТЫВАНИЯ ШКАЛ ЦВЕТОВОГО КОНТРОЛЯ ПРОЦЕССА ПЕЧАТИ

Арапов С.Ю., Дубинин И.С., Арапова С.П., Солодова М.С.
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
пр. Мира, 32, Екатеринбург, Свердловская обл., 620002, Россия,
тел.: (343) 375-46-30, e-mail: arapov66@yandex.ru

Аннотация — Представлены результаты эксперимента по мультиспектральной съёмке оттисков со шкалами, предназначенными для построения icc-профилей печатающих устройств. Рассмотрены причины возникновения случайной и систематической погрешностей при определении спектров отражения и цветовых координат полей на шкалах. Показано, что мультиспектральная съёмка является перспективным направлением создания контрольно-измерительной аппаратуры для полиграфии.

MULTISPECTRAL IMAGING FOR THE READING COLOR CONTROL SCALES OF PRINTING PROCESS1

Arapov S.Yu., Dubinin, I.S., Arapova S.P., Solodova M.S.
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
pr. Mira, 32, Yekaterinburg, Sverdlovsk region, 620002, Russian Federation
ph.: (343) 375-46-30, e-mail: arapov66@yandex.ru

Abstract — The experimental results are presented of multispectral imaging of prints with scales intended for building icc-profiles printers. The article considers causes of random and systematic errors in the determination of reflectance spectra and color coordinates of the fields on the scales. It is shown that multispectral imaging is a promising direction of creation of the instrumental control for printing.

I. Введение

Использование спектрофотометров в качестве средств оперативного контроля печати становится нормой для промышленных систем так и для профессиональных систем цифровой печати в оперативном сегменте полиграфии. Скоростные (до 200 считываний в секунду) спектрофотометры с невысоким (~10 нм) спектральным разрешением давно используются для офлайн контроля в первую очередь для построения профилей. При этом требуются наличие специальных контрольных полей достаточно большого размера, что обусловлено размером апертуры таких приборов.

Мультиспектральная съёмка (МСС), как альтернатива спектрофотометрам в полиграфии, в настоящий момент уступает им по аппаратному спектральному разрешению, однако обладает преимуществом одновременного считывания большого количества информации по всей площади оттиска с возможностью последующего анализа отдельных фрагментов. Это выравнивает конкурентную ситуацию.

Применение МСС для считывания шкал рассматривается в работах [1–5]. Поскольку речь идёт о создании контрольно-измерительной аппаратуры, важной задачей является достоверная аналитическая оценка случайной погрешности измерения, выделение систематической составляющей погрешности, анализ влияющих на них факторов. Вопросы оценки погрешности определения спектров отражения рассмотрены в работах [5, 6].

При МСС шкал с оттисков возникает дополнительный фактор — наличие автотипной

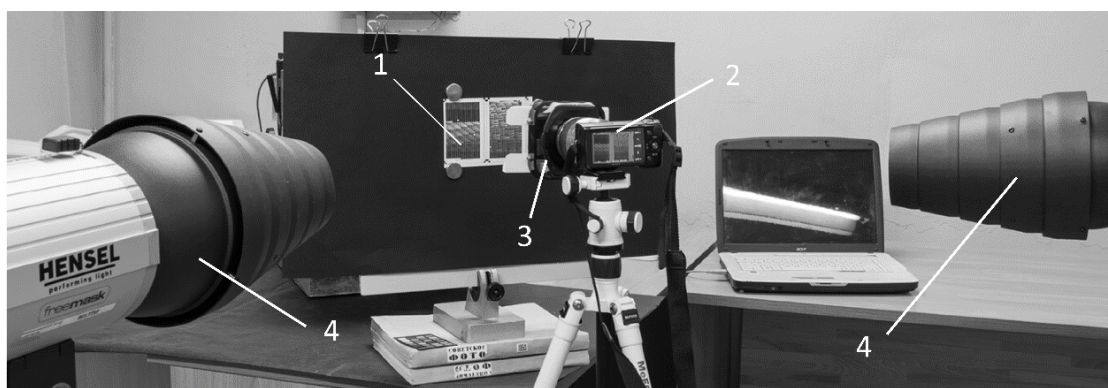
растровой структуры. Публикаций по этому вопросу на момент написания данной работы не обнаружено. Возможно её влияние на результаты МСС в настоящее время не изучено.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование выявления факторов определяющих систематическую погрешность результатов определения цветовых координат полей контрольных шкал, полученных в автотипном печатном процессе.

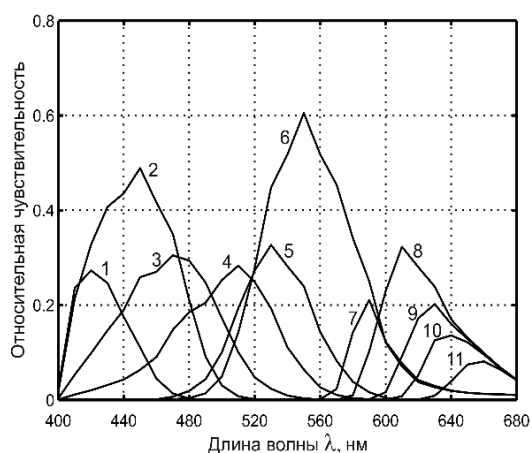
II. Схема и технология проведения эксперимента

Эксперимент проводился по стандартной схеме [1, 7, 8], показанной на рис. 1, а.

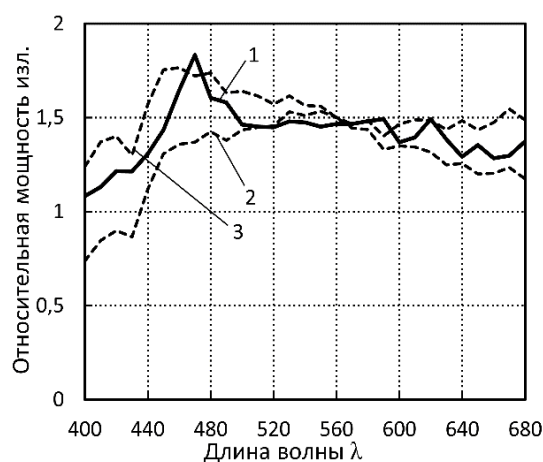
Оттиск со шкалой либо стандартная шкала Color Checker поочерёдно закреплялись на магнитной поверхности держателя, расположенной перпендикулярно оптической оси объектива камеры. Импульсное освещение создавалось двумя студийными вспышками (Hensel) снабжёнными тубусами со встроенными сотовыми коллиматорами. Расположение осуществлялось в соответствии с принятой для фотометрических приборов в полиграфии геометрии (0/45°). Используемая система камера-фильтры, подробно описана в [7, 8], спектральные характеристики виртуальных сенсоров мультиспектральной камеры (МСК) приведены на рис. 1, б. Спектральные измерения использованных в работе шкал и освещения производились спектрофотометром i1Pro (X-Rite) в комплексе с открытым программным обеспечением Argyll CMS. Спектр освещения представлен на рис. 1, в.



а)



б)



в)

Рис. 1 Организация эксперимента

а) общий вид и схема установки: 1 — тестовая шкала, 2 — цифровая камера, 3 — держатель фильтров, 4 — студийные вспышки с коллиматорами и тубусами; б) спектральные характеристики 11-и виртуальных сенсоров мультиспектральной камеры (МСС); в) спектр освещения: 1 — вспышка Hensel, 2,3 — спектры стандартных осветителей D50 и D65(для сравнения).

Основным экспериментальным объектом была сгенерированная в Argyll CMS тестовая шкала (ТШ), состоящая из 1944 полей с различными тоновыми значениями основных колорантов CMYK (рис. 2).

Для печати использовались цифровая машина Konica Minolta Bizhub pro 6000 и мелованная глянцевая бумага. Сгенерированный набор полей размещался на двух форматах А3, после чего полученное изображение (А2) перед печатью снабжалось контрастными шахматными элементами для взаимного совмещения снимков и масштабировалось до форматов А4–А6.

Также производилась распечатка ТШ на пяти листах А4 для считывания спектров отражения спектрофотометром. В результате для каждого поля ТШ формировались контрольные данные — спектры отражения, цветовые координаты X, Y, Z и $L^*a^*b^*$,

которые затем использовались для анализа погрешностей, возникших в процессе обработки данных МСС.

Технология съёмочного процесса и последующей обработки данных достаточно стандартна, она отражена на схеме (рис. 3). Сначала осуществляются МСС калибровочной шкалы, затем замер спектра освещения. Затем следуют расчёты теоретических тоновых значений для пикселей калибровочной шкалы и сопоставление их с экспериментальными на калибровочной диаграмме (рис. 4). После этого становится возможным определение конвертирующей матрицы и реконструкция спектров отражения.

Реконструированные спектры позволяют достичь конечной цели — рассчитать цветовые координаты полей и проанализировать погрешность их определения по отношению к контрольным значениям

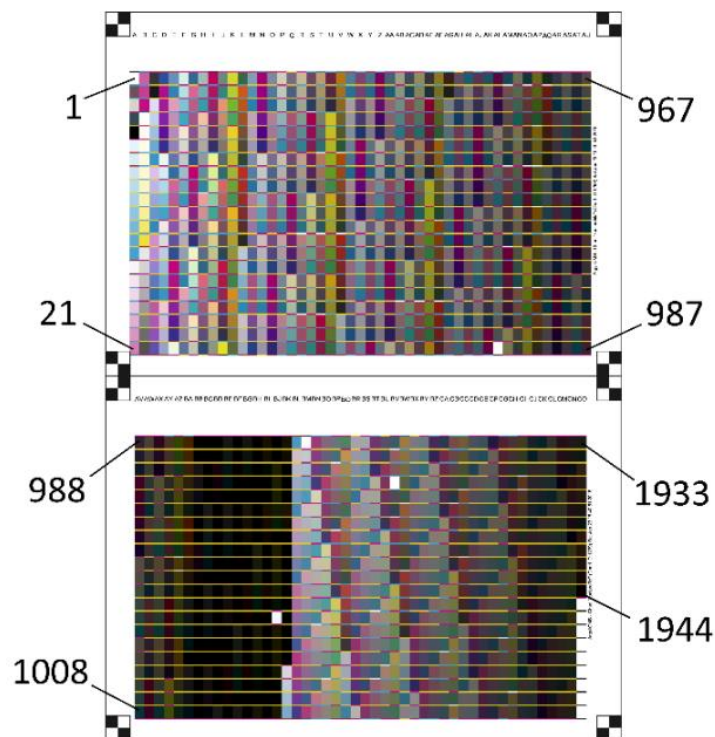


Рис. 2. Тестовая шкала (ТШ), состоящая из 1944 полей с различными тоновыми значениями СМУК. Указанные номера полей иллюстрируют порядок нумерации — сверху-вниз и, затем, слева-направо.

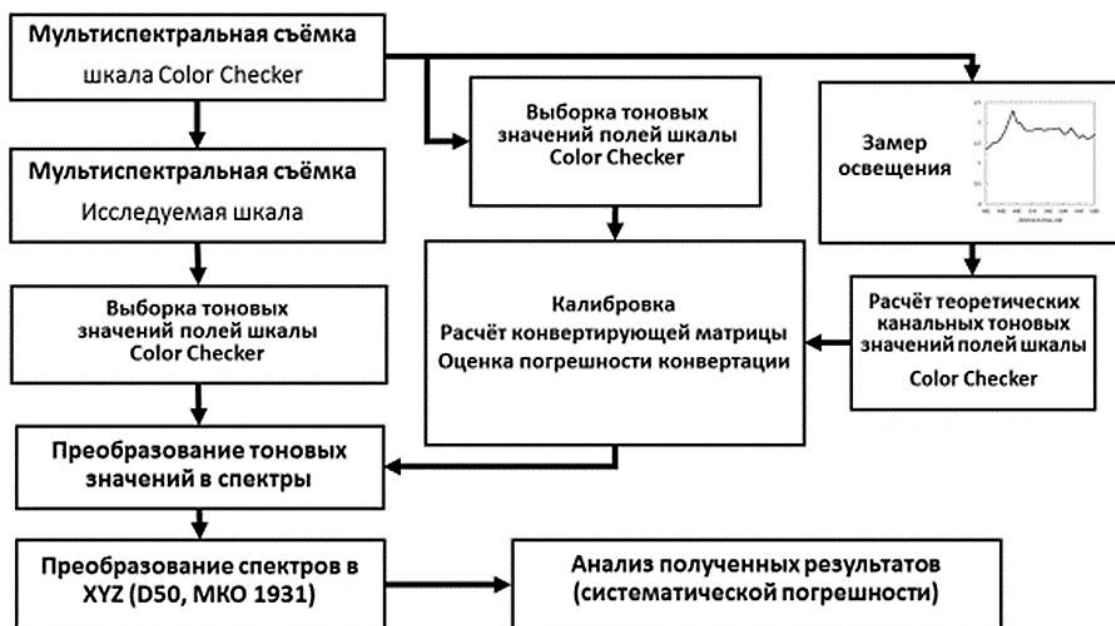


Рис. 3 Схема съёмочного процесса и обработки данных

МСС оттиска с ТШ производится вслед за калибровочной шкалой при соблюдении тех же условий экспозиции. Полученные снимки совмещаются в мультиспектральное изображение из которого осуществляется выборка тоновых значений.

Поскольку оттиски с ТШ содержат автотипные растровые элементы регистрирующиеся камерой в виде муара, выборка представляет собой результат усреднения тоновых значений пикселей прямоугольного фрагмента изображения в пределах поля ТШ.

III. Методы обработки полученных снимков

Обработка данных МСС, как и в работах [1, 2, 5, 6], основана на линейной модели формирования данных с аддитивным шумом:

$$\begin{cases} \mathbf{t} = \mathbf{H}\mathbf{r} + \xi, \\ \mathbf{C} = \text{cov}(\xi), \langle \xi \rangle = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{t} — вектор значений тона, полученных с сенсоров МСК и содержащийся в пикселе изображения, \mathbf{r} — искомый вектор спектральных

значений коэффициента отражения, \mathbf{H} — матрица, получившая в литературе название «функция рассеяния точки» [9], и сформированная из спектральных характеристик сенсоров МСК (рис. 1, а), а так же спектра освещения (рис. 1, б). Кроме того в модель (1) входит случайный вектор аддитивного шума ξ (компоненты которого распределены по нормальному закону) с нулевым мат. ожиданием $\langle \xi \rangle$ и известной ковариационной матрицей \mathbf{C} . Окончательное формирование модели (1) производится в процессе калибровки, заключающейся в сопоставлении извлечённых из мультиспектрального снимка тоновых значений $t_{\text{эксп}}$ с $t_{\text{теор}}$ полученными расчётным путём по модели (1). Сопоставление делается для набора полей с заранее измеренными спектрами отражения $\mathbf{r}_{\text{калибр}}$.

В результате определяются калибровочные коэффициенты для построчного умножения матрицы \mathbf{H} и вектор смещения тоновых значений («уровень чёрного» в каналах МСК). Вычитание смещения из $t_{\text{эксп}}$ приводит $\langle \xi \rangle$ к нулевому значению и позволяет определить набор реализаций шума ξ для вычисления ковариационной матрицы \mathbf{C} . Сопоставление $t_{\text{эксп}}$ и $t_{\text{теор}}$ обычно производится в виде калибровочной диаграммы (рис. 4).

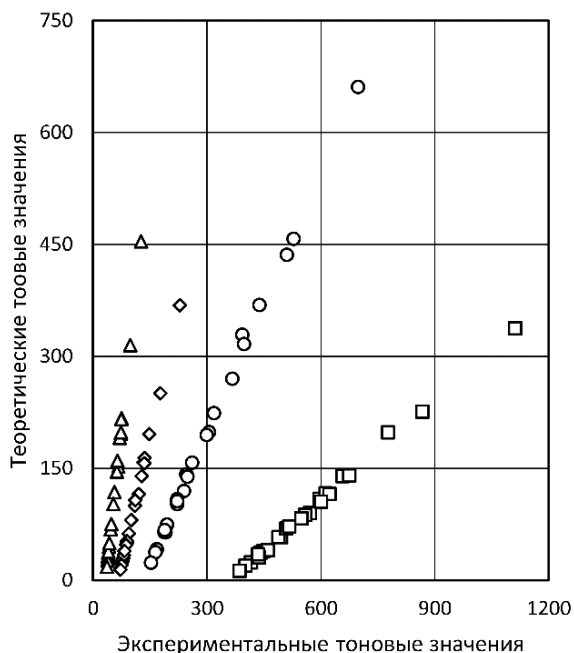


Рис. 4 Калибровочная диаграмма для сенсоров МСК: Δ — сенсор 2, \diamond — сенсор 3, \square — сенсор 4, \circ — сенсор 6. Пересечения прямых с осью абсцисс дают значения уровня чёрного, угловые коэффициенты являются калибровочными значениями для поэлементного домножения строк матрицы \mathbf{H} .

Линейный вид калибровочной зависимости (рис. 4) говорит о качестве калибровки МСК. Наличие большого разброса точек, а также отклонение от линейного вида означает наличие ошибок в экспозиции, в спектральных данных МСК, в спектральных данных полей калибровочной шкалы.

Сформированная таким образом модель (1), как правило, не позволяет найти решение \mathbf{r} непосредственным обращением. В данной работе использовано 11 сенсоров и 29 спектральных зон, и размерность \mathbf{r} превосходит размерность \mathbf{t} . Это препятствие обычно устраняется переходом от поиска \mathbf{r} к поиску его аппроксимации в некотором

базисе из небольшого количества векторов. Во многих работах используются «главные компоненты», полученные из набора предварительно измеренных спектров отражения исследуемого объекта [4]. Это несколько противоречит концепции создания контрольно-измерительной системы, поэтому использовалось разложение по заранее фиксированному базису:

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}\mathbf{x}, \quad (2)$$

где \mathbf{A} — матрица с элементами a_{ij} :

$$\begin{cases} a_{1j} \equiv 1, a_{2j} = \text{erf}(2\theta_j), \\ a_{3j} = \text{erf}\left(4\left(\theta_j - \frac{1}{2}\right)\right), a_{4j} = \text{erf}\left(4\left(\theta_j + \frac{1}{2}\right)\right), \\ a_{5j} = \text{erf}\left(8\left(\theta_j - \frac{3}{4}\right)\right), a_{6j} = \text{erf}\left(8\left(\theta_j - \frac{1}{4}\right)\right), \\ a_{7j} = \text{erf}\left(8\left(\theta_j + \frac{1}{4}\right)\right), a_{8j} = \text{erf}\left(8\left(\theta_j + \frac{3}{4}\right)\right), \\ \theta_j = 2\frac{j-1}{29-1} - 1, i = \overline{1,29} \end{cases} \quad (3)$$

Как показано в [10], этот базис неплохо подходит для аппроксимации типичных спектров отражения в полиграфических репродукционных системах.

С учётом (2) и (3), модель (1) принимает вид:

$$\begin{cases} \mathbf{t} = \mathbf{H}_1\mathbf{x} + \xi, \\ \mathbf{C} = \text{cov}(\xi), \langle \xi \rangle = 0 \end{cases} \quad (4)$$

где $\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}\mathbf{A}$. В работе [5] приводятся полученные из (4) расчётные формулы для несмещённой оценки спектров \mathbf{r} и стандартного отклонения σ_r :

$$\mathbf{r} = \mathbf{A}(\mathbf{H}_1^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}_1)^{-1} \mathbf{H}_1^T \mathbf{C}^{-1} \langle \mathbf{t}_i \rangle, i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{sqrt} \left(\text{diag} \left(\mathbf{A}(\mathbf{H}_1^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{H}_1)^{-1} \mathbf{A}^T \right) \right), \quad (6)$$

где $\langle \mathbf{t}_i \rangle$ — усреднённый вектор тоновых значений мультиспектрального изображения, $\text{sqrt}(\mathbf{X})$ — функция поэлементного извлечения квадратного корня из матрицы \mathbf{X} , $\text{diag}(\mathbf{X})$ — функция извлечения главной диагонали в виде вектора из квадратной матрицы \mathbf{X} . Усреднение в (5) производится по N пикселям, для которых спектр \mathbf{r} считается одинаковым. Например, это может быть выборка пикселей из изображения одного поля контрольной шкалы.

Спектральное распределение коэффициента отражения для полей шкал, позволяет рассчитать их цветовые координаты и проанализировать отклонение от контрольных значений. Все расчёты в данной работе выполнены для стандартного осветителя D50.

IV. Результаты

Первый этап работы заключался в оценке потенциального вклада аппроксимации спектров базисом (3) в погрешность определения цветовых значений полей. Для этого строились наилучшие среднеквадратичные аппроксимации для контрольных спектров отражения полей ТШ и калибровочной шкалы (Color Checker). По аппроксимированным и контрольным спектрам определялись цветовые координаты $L^*a^*b^*$ и цветовые отличия ΔE_{ab}^* (МКО 1976). Поскольку отличия ΔE_{ab}^* в данном случае не являлись реализациями случайной величины, для них некорректно приводить такие

характеристики как математическое ожидание и стандартное отклонение. Оценка производилась по соотношению средних, максимальных и минимальных значений.

Аналогично оценивались цветовые отклонения для спектров, реконструированных по формуле (5) из данных МСС. ТШ размещалась на формате А6. Калибровка мультиспектральной системы производилась по шкале Color Checker, для которой также производилось восстановление спектров и расчёт ΔE_{ab}^* . Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1
Цветовые отличия ΔE_{ab}^* от контрольных значений для полей калибровочной шкалы (Color Checker) и тестовой шалы (ТШ)

ΔE_{ab}^* , среднее (макс./мин.)	Аппроксимация в базисе (3)	Реконструкция по данным МСС
Color Checker	0,17 (0,39/0,01)	1,39 (2,69/0,25)
Тестовая шкала (ТШ)	0,22 (0,59/0,02)	6,99 (17,30/0,37)

Как видно из таблицы 1, отклонения ΔE_{ab}^* при аппроксимации спектров примерно на порядок ниже чем при их реконструкции, и выбор базиса (3) можно признать удовлетворительным. Аппроксимация Color Checker несколько лучше, чем аппроксимация ТШ. Цветовые отклонения ΔE_{ab}^* от контрольных значений, возникшие при реконструкции спектров ТШ, оказались значительно больше чем при реконструкции спектров Color Checker. Это послужило поводом для проведения второго этапа работы.

Второй этап работы так же заключался в реконструкции спектров отражения полей ТШ, но калибровка мультиспектральной системы производилась по выборке полей из самой ТШ. Основу выборки составили первые 44 поля, содержащие наиболее важные примеры спектров, такие как тоновые градации основных колорантов. Дополнительно были созданы калибровочные наборы с добавлением 100 либо 200 из оставшихся 1900 полей, которые выбирались случайным образом. Использовались результаты МСС для ТШ, размещённых на форматах А6 и А4. Данные по цветовым отклонениям для этих спектров представлены в таблице 2.

Таблица 2
Цветовые отличия ΔE_{ab}^* от контрольных значений по набору реконструированных спектров полей тестовой шалы (ТШ) для различных калибровочных выборок и размеров отиска

ΔE_{ab}^* , среднее (макс./мин.)	Формат ТШ А6	Формат ТШ А4
Калибровка по 44 полям	7,51 (28,67/0,29)	5,75 (18,32/0,23)
Калибровка по 144 полям	4,10 (16,23/0,34)	3,91 (14,76/0,23)
Калибровка по 244 полям	4,35 (14,00/0,05)	3,68 (15,68/0,22)

Из сопоставления табл. 1 и табл. 2 следует, что состав калибровочного набора полей существенно влияет на результат обработки данных МСС. Очевидно важна спектральная репрезентативность этого набора по отношению ко всей совокупности обрабатываемых полей шкалы, что созвучно результатам работы [3]. Наименьшие ΔE_{ab}^* получены

при обработке Color Checker, когда реконструкция спектров проводилась для самого калибровочного набора. Получение значения сопоставимы с работой [1], где так же использовалось импульсное освещение. В то же время увеличение КНП со 144 до 244 полей не даёт такого же существенного улучшения показателей точности как при увеличении с 44 до 144.

Из табл.2. так же следует что при выбранном варианте обработки данных не столь существенно влияние автотипной структуры оттисков с ТШ. Размеры автотипных элементов по отношению к пикселям мультиспектрального изображения при изменении формата с А6 до А4 уменьшились в два раза, в то время как цветовые отклонения уменьшились лишь на 10–15 %.

В отличие от аппроксимации спектров, их реконструкция по данным МСС порождает ΔE_{ab}^* являющиеся случайными величинами, но указание математического ожидания и стандартного отклонения также лишено смысла, как и в случае аппроксимации спектров. В основе всех расчётных формул (5–6) лежит обоснованное предположение о нормальности распределения спектральных величин [9]. Цветовые координаты $L^*a^*b^*$ и отклонения ΔE_{ab}^* зависят от спектральных величин нелинейно и следовательно не могут быть распределены по нормальному закону.

Тем не менее соотношение случайной и систематической погрешностей в результатах эксперимента можно оценить по параметрам распределения отклонений цветовых координат X, Y, Z от контрольных значений, полученных с помощью спектрофотометра. Линейно-интегральная зависимость X, Y, Z от спектральных величин предполагает нормальность распределения их значений и позволяет получить из (6) формулу для соответствующего стандартного выборочного отклонения. Это делается путём простого «перехода к базису» \tilde{X} , который представляет собой набор функций сопоставления цвета стандартного наблюдателя (2° МКО 1931), приведённых к относительному колориметрическому виду для осветителя D50:

$$\sigma_{XYZ} = \frac{1}{\sqrt{N}} \text{sqrt} \left(\text{diag} \left(\tilde{X}^T A (H_1^T C^{-1} H_1)^{-1} A^T \tilde{X} \right) \right), \quad (7)$$

где σ_{XYZ} — вектор стандартных отклонений цветовых координат X, Y, Z от контрольных значений. Матрица \tilde{X} рассчитывается следующим образом:

$$\tilde{X} = \frac{100}{d_{50}^T \bar{y}} \text{Diag}(\mathbf{d}_{50}) \mathbf{X}, \mathbf{X} = [\bar{x} \ \bar{y} \ \bar{z}], \quad (8)$$

где \mathbf{d}_{50} — вектор содержащий спектральное распределение стандартного осветителя D50, \mathbf{X} — матрица, столбцы которой $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ составлены из значений функций сопоставления цвета стандартного наблюдателя (2° МКО 1931), $\text{Diag}(\mathbf{X})$ — функция «создающая» диагональную квадратную матрицу, с главной диагональю из компонентов вектора \mathbf{X} .

Выборочные значения математического ожидания и стандартного отклонения ошибки цветовых координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$, полученные на основе МСС представлены в табл. 3. Экспериментальные данные соответствуют реконструированным спектрам по всей ТШ, в

скобках приводится теоретическая оценка полученная с помощью (7) только по КНП. Следует помнить что модель (4) нормализована ($\langle \xi \rangle = 0$), а решение (5) даёт несмещённую оценку спектра, следовательно теоретическое значение мат. ожидания ошибок $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ равно нулю.

Таблица 3

Сравнение экспериментальных и теоретических значений мат. ожидания и ст. отклонения ошибки цветовых координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ по набору полей тестовой шкалы (ТШ) для различных калибровочных выборок и размеров оттиска

Эксп. мат. ож. / эксп. ст. откл. (Теор. мат. ож. / теор ст. откл.)		ΔX	ΔY	ΔZ
А6	Калибровка по 44 полям	0,65/1,67 (0,00/1,53)	0,75/1,67 (0,00/1,47)	0,90/1,34 (0,00/1,35)
	Калибровка по 144 полям	-0,01/1,22 (0,00/1,42)	-0,05/1,25 (0,00/1,34)	0,09/1,11 (0,00/1,23)
	Калибровка по 244 полям	0,18/1,18 (0,00/1,29)	0,10/1,18 (0,00/1,25)	0,24/1,10 (0,00/1,11)
А4	Калибровка по 44 полям	0,26/1,38 (0,00/0,96)	0,24/1,38 (0,00/0,90)	0,01/1,53 (0,00/1,17)
	Калибровка по 144 полям	-0,09/1,25 (0,00/1,21)	-0,11/1,27 (0,00/1,15)	-0,18/1,45 (0,00/1,32)
	Калибровка по 244 полям	-0,02/1,17 (0,00/1,17)	-0,09/1,18 (0,00/1,13)	-0,05/1,38 (0,00/1,34)

Из табл. 3 также следует, что «наиболее удачным» оказался выбор КНП из 144 полей для ТШ формата А6. Экспериментальное выборочное мат. ожидание по отношению к ст. отклонению наиболее близко к нулю, а само ст. отклонение меньше теоретической оценки по КНП. Это можно трактовать как отсутствие систематической погрешности в данном измерении. По среднему отклонению ΔE_{ab}^* (табл. 2) этот эксперимент идёт на «третьем месте». Следующим по «удачности» следует признать КНП из 244 полей для ТШ, размещённой на формате А4, однако соотношения теоретических и экспериментальных значений говорят о наличии систематической ошибки, обусловленной в т.ч. выбором КНП. По среднему отклонению ΔE_{ab}^* (табл. 2) этот эксперимент идёт на «первом месте».

Параллельно с расчётом показателей в табл.3 контролировался внешний вид гистограмм распределения $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$. В результате установлено, что во многих случаях распределение явно не соответствует нормальному закону. Это служит стимулом к дальнейшему совершенствованию элементов экспериментальной системы и, прежде всего, к уточнению спектральных характеристик камеры.

V. Выводы

Проведён предварительный анализ причин возникновения систематической погрешности восстановления спектров и координат цвета. Основным фактором является спектральная репрезентативность калибровочного набора полей. Данное заключение стыкуется с результатами других авторов. В целом, сопоставление экспериментальных и теоретических значений (табл. 3) подтверждает корректность расчётных формул и методов, использованных в данной работе.

Влияние автотипной структуры оттисков на точность определения цветовых значений в рассмотренных пределах изменения размеров

тестовой шкалы незначительно. Считывание производилось

с тестовой шкалы, уменьшенной по площади в 16 раз от своего исходного размера.

Мультиспектральная съёмка является перспективным направлением разработок по созданию контрольно-измерительного оборудования, применимого в полиграфическом производстве.

VI. Литература

- [1] Brauers J., Helling S., Aach T. Multispectral Image Acquisition with Flash Light Sources // J. Imaging Sci. Technol. 2009. Vol. 53, № 3. P. 311103.
- [2]
- [3] Valero E.M. et al. Comparative performance analysis of spectral estimation algorithms and computational optimization of a multispectral imaging system for print inspection // Color Res. Appl. 2014. Vol. 39, № 1. P. 16–27.
- [4] Eckhard T. et al. Adaptive global training set selection for spectral estimation of printed inks using reflectance modeling // Appl. Opt. 2014. Vol. 53, № 4. P. 709.
- [5] А.Ш. Сыдигов и др. Псевдоинверсная обработка данных мультиспектральной фотосъёмки в стационарных зонах изображения // Сборник докладов Международной конференции «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления». Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 179–185.
- [6] Арапов С.Ю. и др. Оценка погрешности реконструкции спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъёмки // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2015. № 3. С. 68–77.
- [7] Арапов С.Ю. и др. Восстановление спектров отражения тестовых полей по данным мультиспектральной фотосъёмки // Материалы международной научно-практической конференции (Екатеринбург, 19–20 марта 2015 г.) Передача, обработка, восприятие текстовой и графической информации. Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 21–33.
- [8] Арапов С.Ю., Арапова С.П., Тягунов А.Г. Экспериментальный комплекс мультиспектральной фотосъёмки на основе стандартной цифровой камеры // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2014. № 5. С. 45–54.
- [9] Шавкутенко Е.Н. и др. Мультиспектральная фотосъёмка с помощью стандартной цифровой фотокамеры // Сборник докладов Международной конференции «Информационные технологии, телекоммуникации и системы управления» Екатеринбург: УрФУ, 2015. С. 127–134.
- [10] Теребиж В.Ю. Введение в статистическую теорию обратных задач. Москва: Физматлит, 2005. 376 с.
- [11] Арапов С.Ю. и др. Моделирование спектров отражения на основе базиса из функций типа интеграла ошибок // Известия высших учебных заведений. Проблемы полиграфии и издательского дела. 2012. № 6. С. 017–029.